

Ar, He 및 N₂가스의 α-입자 저지능과 저지 단면적 측정

이정훈 · 황재광 · 황한열 · 정원모
연세대학교 물리학과

주 관 식
명지대학교 물리학과

요 약

3MeV에서 5.4MeV 사이의 α-입자에 대한 저지능과 저지 단면적을 He, Ar, 및 N₂ 가스에 대해서 측정했다. Srivastava의 저지능 공식을 본 실험결과에 적용시켜 그 타당성을 알아보았다. 그결과 Ar의 경우는 매우 잘 일치됨을 보여주며, He의 경우는 27-28%, N₂의 경우는 13-26%의 불일치를 보여주고 있다.

I. 서 론

저지능 실험자료는 핵물리나 보건물리 뿐만 아니라, 방사선을 이용하는 각종 산업체에 광범위한 응용분야를 갖고있다. 지난 50여년 동안 10MeV 이하의 ion 이 물질을 통과할때의 저지능과 저지 단면적에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다.[1-8] 알파 입자나 중이온에 대한 저지능 실험치가 Bohr[10]와 Bethe[11]의 저지능 공식과 일치하지 않는 점을 설명하기 위해, Mukherji 와 Srivastava[10,12]가 1974년에 partially stripped ion에 대해 이론식을 계산해서 실험치와 비교 하였으며, 1976년도에 partially and completely stripped ion에 대해 공통적으로 이용할 수 있는 이론식을 제시하였다. 그리고 그 연구그룹은 Bohr 와 Bethe이론이 잘 맞지 않는 여러 영역에서 이식의 적용성 여부를 조사했으며, 일반적으로 좋은 결과를 이끌어 냈었다. 이들의 적용 ion은 중이온이었으며, 이러한 견지에서 아직 적용성 여부가 확실치 않은 α-입자에 대해서 조사했다. 본 실험에서는 3-5.4 MeV 사이의 에너지를 갖고 있는 α-입자가 He, Ar, 과 N₂ 가스를 통과할때 생기는 저지 단면적과 저지능을 측정하여 이론값과 비교 분석하였다.

II. Stopping Power방정식

Bohr[10]에 의한 저지능 공식은

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi Z_1^2}{mV^2} e^4 n Z_2 \ln\left(\frac{1.123 mV^2}{Z_1 e^2 w}\right) \dots \dots \dots (1)$$

이고, Bethe[11-13]에 의해 수정된 저지능 공식은

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi Z_1^2}{mV^2} e^4 n Z_2 \left(\ln \frac{2mv^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 - \frac{C_K}{Z_2} - \frac{C_L}{Z_2} \dots \dots \right) (2)$$

n : 투과 물질의 단위 체적당 원자수, C_K, C_L : K 또는 L-Shell 전자가 저지능에 미치는 영향인데, 두 공식은 모두 completely stripped ion의 경우에 대해 적용된 공식이다. 이 두 공식의 적용 영역은 Bohr 공식은 $X = \frac{2 Z_1 V_0}{V} \gg 1$ 이고, Bethe 공식은 $X = \frac{2 Z_1 V_0}{V} \ll 1$ 이다. 또한 공식(1)의 고전적인 특징과 공식(2)의 양자역학적인 특징을 통합시킨 새로운 공식을 Bohr가[12] 제시했다.

$$\frac{dE}{dx} = \frac{2\pi Z_1^2 e^4 n}{mV^2} \left\{ \sum_s \ln(n_s^2 (X)^2) + \sum_s \ln(n_s^2 \left(\frac{X}{n_s}\right)^2) \right\} \dots \dots (3)$$

이식을 이용해서 1974년에 Mukherji와 Srivastava가

[12] partially stripped ion의 경우에 대해 새로운 식을 유도했는데 가벼운 고체투과 물질이나 가벼운 기체물질에 대해서는 다음과 같다.

$$\frac{dE}{dx} = 1.327 \frac{f(Z_2)}{A_2} \{4.7622 [f(Z_1)]^{1/3} + f(Z_1)\} V \dots (4)$$

여기서 $Z < 45.5$ 에 대해 $f(z) = 0.28Z^{2/3}$ 이다. 또한 1976년에 Mukherji와 Srivastava는 [10] Bohr와 Bethe 이론이 잘 맞지 않는 영역에서 partially and completely stripped ion에 대해서 적용시킬 수 있는 식을 유도했다.

$$X < 1, V < \frac{1}{2} Z_2 V_0$$

$$\frac{dE}{dx} \left(\frac{\text{MeV} \cdot \text{m}^2}{\text{mg}} \right) = \frac{50.6}{AV} f(Z_2) (Z_1^{\text{eff}})^2 \dots (5)$$

$$X < 1, V > \frac{1}{2} Z_2 V_0$$

$$\frac{dE}{dx} \left(\frac{\text{MeV} \cdot \text{cm}^2}{\text{mg}} \right) = \frac{63.65}{AV^2} Z_2 (Z_1^{\text{eff}})^2 \times \left[\log_{10} \frac{11.39 V^2}{I(1-\beta^2)} - \frac{\beta^2}{2.303} \right] \dots (6)$$

단, V : 입사이온의 속도 (10^8 cm/sec 단위),

$V_0 (= e^2 \hbar^{-1}) : 2.184 \times 10^8$ cm/sec,

I : 이온화 potential,

Z_1 : 입사이온의 전하

Z_2 : 투과물질의 전하이다.

또한 유효 전하 Z^{eff} 와 이온화 potential I 는 다음과 같다.

$$Z^{\text{eff}} \geq \frac{1}{2} Z, Z^{\text{eff}} = Z [1 - 2.03 \exp(-2vf(Z)/ZV_0)]^{1/2} \dots (7)$$

$$Z^{\text{eff}} < \frac{1}{2} Z, Z^{\text{eff}} = f(z) \left(\frac{V}{V_0} \right) \dots (8)$$

$$Z \log I = (Z-2) \log 13.6 [(Z-2)/2.717f(Z)]^2 + 2 \log (13.6 Z_2) \dots (9)$$

이 경우에, 3MeV와 6MeV의 α -입자에 대해 투과 물질이 Ar 일때는 식(5)가 적용되며, N_2 와 He 일때는 식(6)이 적용된다.

III. 실험

실험장치를 그림1에 나타내었다. 실험에 사용한 선원은 ^{241}Am 의 자연 방사성 원소가 α -붕괴시 나오는 5.486MeV의 α -선을 사용하였으며, 선원의 직경은 10 mm이고 선원의 강도는 초당 2KBq 이었다.

선원은 한국표준연구소에서 Alumized Mylar 비닐 위에 증착된 상태로 만들어졌다. 본 실험에서 사용된

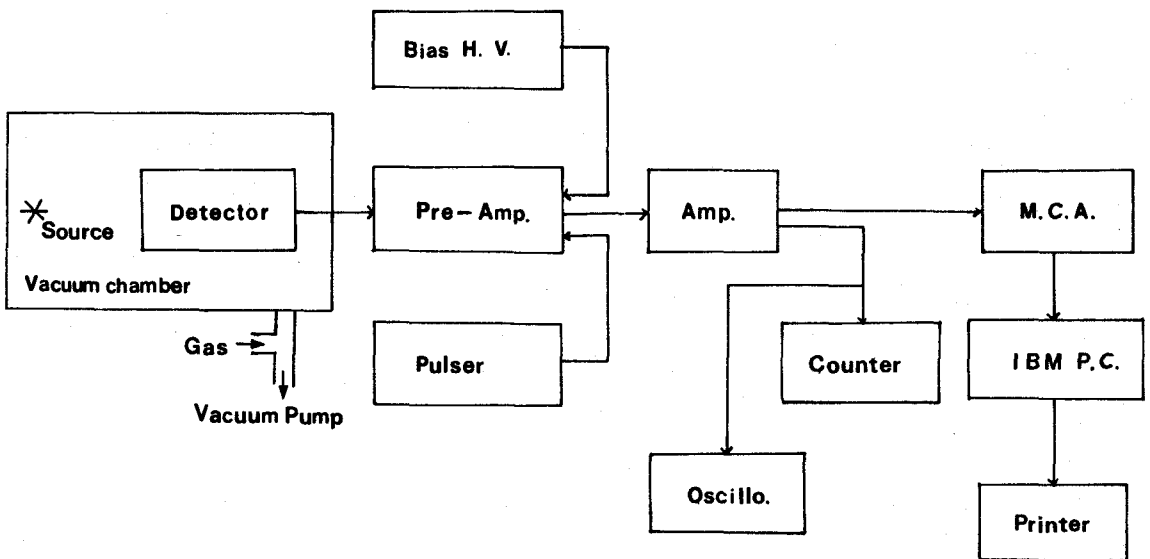


Fig.1. Electronic block diagram for alpha spectroscopy.

검출기는 EG & G Ortec 제품인 표면 장벽형 검출기를 사용했으며, 직접 측정된 FWHM이 5.486MeV에 대해 1×10^2 torr의 진공도에서 23keV 이었다. He, Ar, N₂ gas는 99.995%의 순도를 갖고 있으며, 진공도 측정은 수은 U 관 부압계와 Pyrani 진공 게이지를 사용했다. 또한 선원과 검출기 사이의 거리는 2.2cm로 고정시키고, 압력을 1×10^2 torr부터 760torr 근처까지 변화시키면서 실험을 행하였다. 본 실험에서 측정될 물리량들은 입사 α-입자에너지(E_0), 잔여평균 α-입자에너지 (E_α)와 기체흡수두께 ($\sigma = \rho x$)이다. 에너지 교정은 펄스제조기로 하였으며, 최소 자승법에 의해 3차함수로 나타낸 결과 표준편차는 1.9 keV 이었다. 또한 잔여 에너지는 Peak Fitting Program을 이용해서 찾았다.

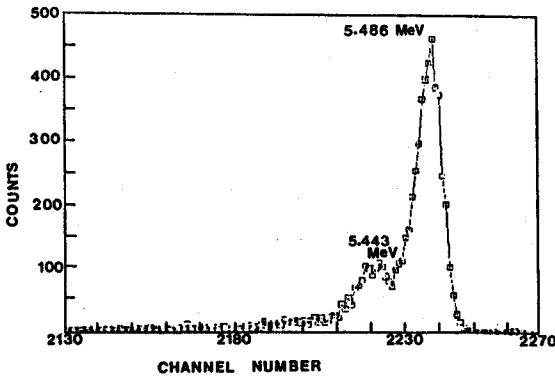


Fig.2. Alpha-ray spectrum of ²⁴¹Am in vacuum of 1×10^{-2} mm Hg.

IV. 결과 및 논의

그림3, 그림4, 그림5에 α-입자의 잔여에너지흡수두께에 따른 이론치와 실측치를 비교하여 보였다. He 과 N₂는 Ar에 비해 이론과 커다란 불일치를 보여주고 있다. $\Delta\sigma = \rho \Delta x$ 와 잔여 에너지를 이용해서 실험저지능과 저지 단면적을 구했다. $S(E_\alpha)$ 를 에너지 E_α 에서의 저지능이라 할때, 실험적으로 구한 저지능 $S(E_\alpha) = \frac{\Delta E}{\Delta \sigma}$ 에 해당하는 에너지 E_α 는 Chilton과 Cooper 그리고 Harris(14,15)에 의해서 다음 식으로 주어진다.

$$E_\alpha = E_{av} \left(1 + \frac{r-1}{24} \left(\frac{\Delta E}{E_{av}} \right)^2 + \dots \right) \dots \dots \dots (11)$$

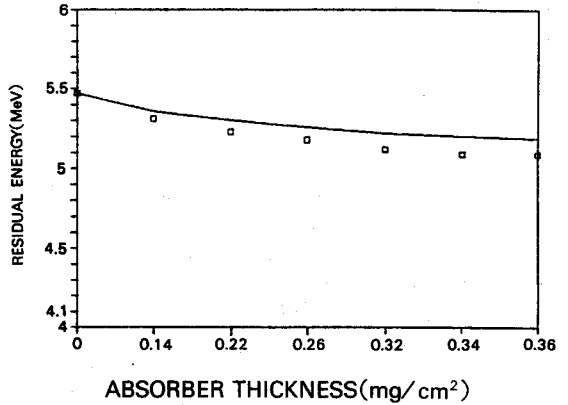


Fig.3. Absorber thickness dependence of residual energy(E_α) in He gas (□ : experimental, - : theoretical).

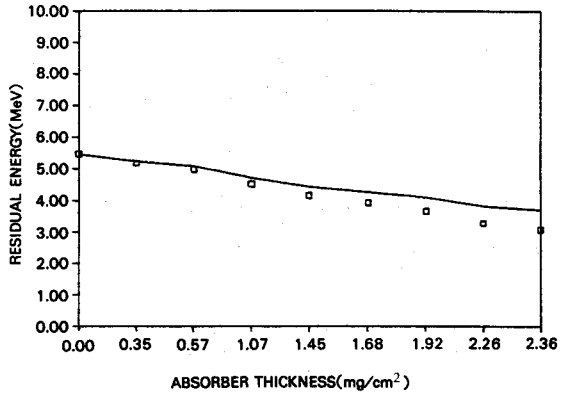


Fig.4. Absorber thickness dependence of residual energy(E_α) in N₂ gas (□ : experimental, - : theoretical).

여기서 $S(E_\alpha) = a E_\alpha^{-r}$ 함수로 최소자승 근사할 수 있다. 또한 $E_{av} = 1/2(E_i + E_f)$ 이고 $\Delta E = |E_f - E_i|$ 이며, E_i 와 E_f 는 각각 입사 α-에너지와 투과후의 α-에너지이다. 여기서 구하고자 하는 E_α 는 iteration method에 의해 구해진다. 저지능 $S = \frac{dE}{\rho dx}$ 이고, 저지단면적 $\epsilon = \frac{dE}{N dx}$ 이며 $N = \frac{N_0}{V} \text{ atoms/cm}^3$ 이므로 $\epsilon = 1.661 \times A \times S (10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{cm}^2)$ 이다. 이때 본 실험에서 구한 확률 오차는 0.6745

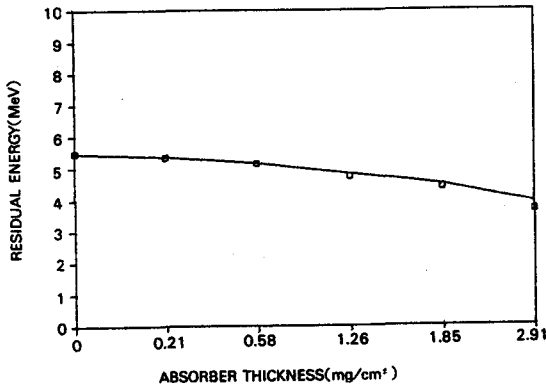


Fig.5. Absorber thickness dependence of residual energy(E_a) in Ar gas (\square : experimental, $-$: theoretical).

$\times \frac{\sigma}{S_{exp}} \times 100\%$ 로 계산되었다. 또한 본 실험에서는 식 (11)에서 두번째 항까지만 고려했고, $\Delta E < 1\text{MeV}$ 인 조건하에서 저지 단면적을 구했다.

표1에 fitting 변수의 값을 표시했으며, 표2와 그림6에 실험적으로 구한 Ar, He 그리고 N_2 가스를 통과해 지나가는 α -입자의 저지능과 저지단면적을 나타내었다. Srivastava와 Muhkerji의 이론치에 Ar의 경우는 매우 잘 일치하고 있으며 확률오차도 제일 적음을 알

Table 1. Fitting values of the parameters used in these work. ($S(E_a) = a(E_a)^{-r}$)

	Ar	He	N_2
a	1.6699	2.9033	4.5007
r	0.6777	0.5797	1.0345
σ (MeV)	1.42×10^{-2}	11.39×10^{-2}	8.94×10^{-2}

* σ : Standard Deviation

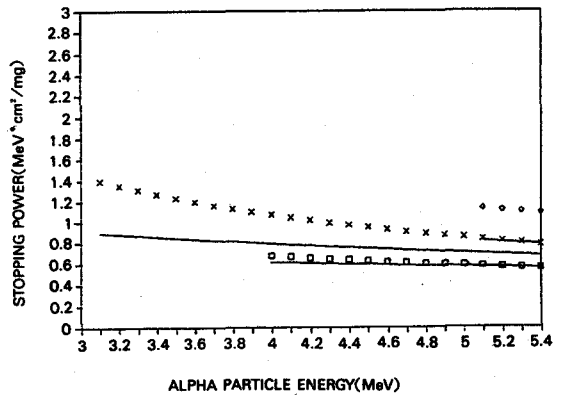


Fig.6. Relation between α -particle energy and stopping power. (\diamond -He, \times - N_2 , \square -Ar ; experimental values in this work, $-$; theoretical values).

Table 2. Experimental and theoretical values of stopping power $S(E_a)$ and stopping cross-section $\epsilon(E_a)$.

Gas	E_a (MeV)	S_{exp} ($\frac{\text{MeV} \cdot \text{cm}^2}{\text{mg}}$)	Probable Error (%)	ϵ_{exp} ($10^{-15} \text{eV} \cdot \text{cm}^2$)	S_{th} ($\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 / \text{mg}$)
Ar	4.00	0.680	1.4	45.16	0.618
	4.10	0.670	1.4	44.44	0.614
	4.20	0.659	1.5	43.75	0.609
	4.30	0.649	1.5	43.09	0.605
	4.40	0.640	1.5	42.45	0.590
	4.50	0.630	1.5	41.84	0.596
	4.60	0.621	1.5	41.25	0.581
	4.70	0.613	1.6	40.68	0.587
	4.80	0.605	1.6	40.13	0.573
	4.90	0.597	1.6	39.60	0.579
	5.00	0.589	1.6	39.08	0.575
	5.10	0.581	1.6	38.58	0.561
	5.20	0.574	1.7	38.10	0.567
	5.30	0.567	1.7	37.63	0.553
	5.40	0.560	1.7	37.18	0.559

Table 2. (Continued)

Gas	E _α (MeV)	S _{exp} ($\frac{\text{MeV} \cdot \text{cm}^2}{\text{mg}}$)	Probable Error (%)	E _{exp} ($10^{-15} \text{eV} \cdot \text{cm}^2$)	S _{th} ($\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$)
He	5.10	1.129	6.8	7.50	0.817
	5.15	1.123	6.8	7.46	0.823
	5.20	1.116	6.9	7.42	0.808
	5.25	1.110	6.9	7.38	0.803
	5.30	1.104	7.0	7.34	0.798
	5.35	1.098	7.0	7.30	0.794
	5.40	1.092	7.0	7.26	0.789
	N ₂	3.10	1.396	4.3	32.47
3.20		1.351	4.5	31.42	0.879
3.30		1.309	4.6	30.44	0.868
3.40		1.269	4.8	29.51	0.857
3.50		1.232	4.9	28.64	0.846
3.60		1.196	5.0	27.82	0.835
3.70		1.163	5.2	27.04	0.825
3.80		1.131	5.3	26.30	0.815
3.90		1.101	5.5	25.60	0.805
4.00		1.073	5.6	24.94	0.795
4.10		1.046	5.8	24.31	0.785
4.20		1.020	5.9	23.72	0.776
4.30		0.995	6.1	23.14	0.767
4.40		0.972	6.2	22.60	0.758
4.50		0.950	6.4	22.08	0.749
4.60		0.928	6.5	21.59	0.740
4.70		0.908	6.6	21.11	0.732
5.80		0.888	6.8	20.66	0.734
4.90		0.870	6.9	20.22	0.716
5.00		0.852	7.1	19.80	0.708
5.10		0.834	7.2	19.40	0.700
5.20		0.818	7.4	19.01	0.693
5.30	0.802	7.5	18.64	0.685	
5.40	0.786	7.7	18.28	0.678	

수 있다. 그리고 N₂ 가스의 경우도 5MeV 사이에서 비교적 좋은 일치를 보여주고 있지만 N₂ 가스의 그의 영역과 He 가스의 경우 이론치와 실험치 25-36%의 불일치를 보여 주고있다. $2Z_1V_0 = 0.099 Z_1^2 = 0.396$ MeV이므로, 본 실험의 에너지 영역은 Born Approximation 조건이 만족되는 $E_\alpha > 0.396$ MeV 영역이다. 따라서 $X > 1$ 이다. 또한 α-입자가 투과물질의 K-shell 전자보다 빨리 움직여서 Bethe 공식이 유용할 조건은 $v > Z_2V_0 = Z_2C/137$ 이다.

즉 $E_\alpha > 0.025 Z_2^2$ 이다. [16] 이때 $0.025 Z_2^2$ 은 Ar의 경우 8.1MeV 이며, He의 경우 0.4MeV, N₂의 경우 1.225MeV 이다. 즉 Bethe 공식이 유용할 에너지 영역은 Ar의 경우 $E_\alpha \gg 8.1\text{MeV}$, He의 경우 $E_\alpha \gg 0.4\text{MeV}$, 그리고 N₂의 경우 $E_\alpha \gg 1.225\text{MeV}$ 이다. 따라서 이러한 점을 고려할 때 본 실험의 에너지 영역에서는 He 과 N₂은 비교적 Bethe 이론으로 설명이 되리라 생각되며, Ar의 경우는 Srivastava와 Mukherji의 공식으로 이해될 수 있으리라 생각된다. 다만, 5MeV 근처에서

N_2 의 경우가 He의 경우보다, Srivastava와 Mukherji의 이론과 좀더 접근함을 보이지만, 역시 He과 N_2 의 경우가 나타나는 오차는 Bethe 이론에서의 투과물질 전자의 K-각 과L-각 효과나 α -입자의 유효 전하, 그 외에 이온화 potential I에 대한 좀더 정확한 이해로 해결될 수 있으리라 사료된다. 본 실험의 에너지 영역은 핵과의 반응을 무시할 수 있는 영역이며, 단지 전자와의 전자기적 반응에 의해서 설명될 수 있는 영역이다.

이때, Srivastava와 Mukherji의 이론과 Bohr와 Bethe의 이론을 종합해서 전자와의 반응으로 저지능을 설명할 수 있는 전 에너지 영역을 설명하는 것이 이론적인 과제인 것 같다. 이러한 견지에서 Srivastava와 Mukherji의 이론을 실험을 통해서 확인했고, N_2 의 경우는 5MeV 이상에서 이론과 15%의 오차 범위에서 일치하고 있으며 그외의 에너지 영역과 He의 경우는 전반적으로 이론과 25-36%의 불일치를 확인했다.

V. 결 론

본 실험에서는 ^{241}Am 의 5.486MeV α -입자에 대한 투과물질로 He, N_2 , Ar가스를 선택했다. 실험으로 구한 저지능과 저지 단면적은 Ar의 경우 확률 오차가 1.4%~1.7%이며 Srivastava의 이론과 일치율 보여 주고 있다. He의 경우는 5.1 MeV와 5.40MeV 사이에서 확률오차가 6.8%~7%이며, 위 이론과 27~28%의 오차를 보여 주었다. 또한 N_2 의 경우는 확률오차가 4.3~7.7%이며, 위 이론값과 13-36%의 오차를 나타내었다. 이러한 점을 고려할때, 본 실험의 α -입자 에너지 영역 3-5.4MeV 에서 Ar의 경우는 Srivastava의 이론으로 설명이 될 수 있는 가능성을 확인했고, He과 N_2 의 경우는 이 이론과 많은 차이가 있음을 알았다.

또한 이번 연구에서 행하지 못한 에너지 영역에 (17)대해서 특히 Bethe공식과 Srivastava 공식의 적용 영역이 겹치는 경우로 생각되는 에너지 영역에 대해 연구를 추진해 나갈 것이다. 좀더 구체적으로, N_2 와 He에 대해, 1~3MeV의 α -입자 에너지 영역에 대해 실험을 할 예정이다.(4,18-20)

REFERENCES

1. Yohta Nakai, Tatsuo Tabata and Shigeru Okabe, "Stopping power of matter for electrons below 10 keV", *Jpn. J. App. Phys.*, 51, 279-285(1982).
2. Ryutaro Ishiwari, "Stopping power of matter for protons and alpha particles", *Jpn. J. App. Phys.*, 51, 286-292(1982).
3. H.H. Andersen, F. Besenbacher and H. Knudsen, "Stopping power and straggling of 65-500 keV lithium ions in H_2 , He, CO_2 , N_2 , O_2 , Ne, Ar, Kr and Xe", *Nucl. Inst. Meth.*, 149, 121-127(1978).
4. Claus Hanke and Jens Laursen, "Stopping cross sections for α particles from 1.0 to 8.5 MeV in H_2 , He, N_2 , O_2 , Ne, Kr and Xe", *Nucl. Inst. Meth.*, 151, 253-260 (1978).
5. 정원모, 윤갑동, "여러가지 얇은 막을 통과하는 전자의 에너지 손실" 원자력 연구논문집, 9(1), 1-8(1969).
6. 정원모, 윤갑동, "베타선에 대한 여러가지 물질의 저지능 측정", 연세논총, 6, 315-326(1969).
7. Shanker Mukherji and A.K. Nayak, "Calculation of heavy ion ranges in complex media", *Nucl. Inst. Meth.*, 159, 421-431(1979).
8. 정원모, 강인식, 주관식, "여러가지 기체를 통과하는 α -입자의 에너지 손실", 연세대 자연과학연구소 학술논문집, 8, 27-31(1981).
9. 정원모, 한정훈, 주관식, "Ar, He, Air와 Ar(90%) + CH_4 (10%) 기체를 통과해 지나가는 α -입자의 에너지 손실", 명지대 자연 과학연구소 학술논문집, 16, 503-510(1985).
10. Brijesh K. Srivastava and Shanker Mukherji, "Range and Stopping-power equations for heavy ions", *Phys. Rev.*, A14, 718-725(1976).
11. Shankar Mukherji, "Calculation of the mean ionization potentials of the elements for stopping-power computations", *Phys. Rev.*, B12, 3530-3532 (1975).
12. Shankar Mukherji and Brijesh K. Srivastava,

- “Universal range-velocity and stopping-power equations for fission fragments and partially stripped heavy ions in solid media”, *Phys. Rev.*, **A9**, 3708-3719(1974).
13. M.C. Walske, “Stopping power of L-electrons”, *Phys. Rev.*, **101**, 940-944(1956).
14. A.B. Chilton, J.N. Cooper and J.C. Harris, “The stopping powers of various elements for protons of energies from 400 to 1050 keV”, *Phys. Rev.*, **93**, 413-419(1954).
15. P.D. Bourland, W.K. Chu and D. Powers, “Stopping cross sections of gases for α particles from 0.3 to 2 MeV”, *Phys. Rev.*, **B3**, 3625-3635 (1971).
16. F.W. Martin and L.C. Northcliffe, “Energy loss and effective charge of He, C and Ar ions below 10 MeV/amu in gases”, *Phys. Rev.*, **128**, 1166-1174 (1962).
17. A.K. M.M. Haque and R.M. Hora, “Energy loss and straggling of alpha particles in argon”, *Nucl. Inst. Meth.* **104**, 77-83 (1972).
18. W.K. Chu and D. Powers, “Energy loss of α particles in noble gases from 0.3 to 2.0 MeV”, *Phys. Rev.*, **B4**, 10-15(1971).
19. P.D. Bourland and D. Powers, “Bragg-rule applicability to stopping cross sections of gases for α particles of energy 0.3-2.0 MeV”, *Phys. Rev.*, **B3**, 3635-3641(1971).
20. W.K. Chu, M. Braun, J.A. Davies, N.Matsunami and D.A. Thompson, “Energy loss of He ions in solidified gases”, *Nucl. Inst. Meth.*, **149**, 115-120 (1978).

The Stopping Power and Cross-section Measurement of α -particle in Ar, He and N₂ gases

Jung Hoon Lee, Jae Kwang Hwang, Han Yull Hwang, Won Mo Chung

Department of Physics, Yonsei University

Koan-Sik Joo

Department of Physics, Myungji University

ABSTRACT

The energy losses of α -particle with 3 to 5.4 MeV energy were measured as a function of gas absorber thickness and α -particle energy in three light gaseous media ; He, Ar, and N₂. The stopping powers and stopping cross-sections were determined by analyzing these data. For Ar gas, the experimental values are very well consistent with the corresponding values of Srivastava's stopping-power theory with the condition of the completely and partially stripped ion. For N₂ and He gases, these experimental values express the inconsistencies of about 13~36% and 27~28%, respectively.